

文章编号: 1001-1595(2011)S-0145-06

关于坐标旋转法进行地球静止轨道导航卫星广播星历拟合的探讨

阮仁桂, 贾小林, 吴显兵, 冯来平

西安测绘研究所, 陕西 西安 710054

Broadcast Ephemeris Parameters Fitting for GEO Satellites Based on Coordinate Transformation

RUAN Rengui, JIA Xiaolin, WU Xianbing, FENG Laiping

Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054 China

Abstract : An introduction on broadcast ephemeris parameters fitting for GEO satellites based on coordinate transformation is presented. The formulas of the relationship between the new instantaneous orbital elements as well as their perturbation and that before coordinate transformation are derived, and influence of difference inertial coordinate (different X -axes orientation or different rotation angle) is analyzed. Experiments for broadcast ephemeris parameters fitting from simulated GEO orbit data are conducted to analyze the impact of different rotation angular adopted on the fitted ephemeris parameters. Our analysis and experiments show that: first, the inclination angle of the orbit obtained by simplified coordinate transformation is not constant but subject to periodic variation. Second, the perturbation of inclination angle in original frame may be magnified and then absorbed by the perturbation of inclination angle and perigee in the new coordinate system, while the magnification varies from tens to thousands and sometime singularity happens. Third, the range of some fitted GEO broadcast ephemeris parameters such as "Mean Motion Difference From Computed Value" and "Rate of Right Ascension" gradually decrease as the rotation angle increases.

Key words : broadcast ephemeris, GEO, coordinate transformation, perturbation of orbital elements

摘 要: 介绍基于坐标旋转法的 GEO 广播星历拟合算法, 推导坐标系旋转前后卫星瞬时轨道根数及其摄动的解析关系式, 分析选择不同惯性系(不同的 X 轴指向和不同旋转角)对卫星轨道根数及其摄动的影响, 通过仿真 GEO 轨道的广播星历拟合实验分析不同坐标旋转角度对星历参数拟合结果的影响。分析和试验表明: ① 采用简化法, 经坐标变换后得到的轨道倾角不为常数, 而是随着选择的参考历元不同呈周期性变化; ② 选择不同的惯性参考系会导致轨道倾角摄动以不同的放大倍数放大后被新坐标系的轨道升交点赤经摄动和近地点幅角摄动吸收, 放大倍数可达几十倍至上百倍甚至出现奇点; ③ 拟合得到的 GEO 卫星星历参数 Δn 和 $\dot{\Omega}$ 的取值范围随坐标旋转角的增大而减小。

关键词: 广播星历; 地球静止轨道(GEO); 坐标旋转; 根数摄动

中图分类号: P228

文献标识码: A

1 引 言

广播星历是导航卫星轨道信息的载体, 是卫星导航服务的空间参考基准。广播星历的表达形式影响着导航卫星系统电文结构设计、用户算法甚至影响系统的性能。GPS 广播星历采用二体问题 Kepler 椭圆轨道根数加上长期和周期摄动参数的形式, 具有物理意义明确、外推能力强、数据量小、用户计算量适中的特点, 被许多新兴的导航卫星系统采用。

尽管 GPS 的广播星历形式应用于 MEO 卫星, 已经得到充分的理论和实践应用验证, 并不意味着这一星历表示形式适合其他轨道(如

GEO)。文献[1]分析了利用 GPS 广播星历形式拟合 MEO、IGSO 和 GEO 轨道的精度及效率, 指出将 GPS 广播星历形式直接用于拟合 GEO 卫星轨道并不合适, 并提出了通过坐标旋转加以解决的方法。在此基础上, 文献[2]的实验分析表明选择不同旋转轴(即不同的惯性系坐标轴指向)对拟合精度没有影响。

本文从坐标旋转变换前后卫星瞬时轨道根数及其摄动的解析关系式, 来分析不同惯性坐标系选择(不同 x 轴指向或不同旋转角度)对瞬时卫星轨道根数和 GEO 星历参数拟合结果的影响。

2 GPS 广播星历参数

GPS 广播星历采用 15 参数形式, 星历参数包括参考时刻的 6 个 Kepler 根数(半长轴的平方根 \sqrt{A} , 偏心率 e , 近地点幅角 ω , 参考历元的平近点角 M_0 , 参考历元时刻升交点在周起始历元地固坐标系的经度 Ω_0 , 参考历元轨道倾角 i_0) 和 9 个摄动参数(卫星平均运动速率计算值的改正量 Δn , 升交点赤经的变化率 $\dot{\Omega}$, 轨道倾角变化率 \dot{i} , 纬度幅角的余弦、正弦摄动调和改正振幅 C_{uc} 、 C_{us} , 轨道半径的余弦、正弦摄动调和改正振幅 C_{rc} 、 C_{rs} , 轨道倾角的余弦、正弦摄动调和改正振幅 C_{ie} 、 C_{is})。其中摄动调和项主要来自地球引力场二阶带谐项和月球引力的短周期项; $\dot{\Omega}$ 主要由地球引力场二阶带谐摄动引起, 也包括地球自转轴摆动、地球自转和极移的影响。由于根数中没有体现 ω 变化的参数, Δn 则综合了半长轴和 ω 的长期变化^[3]。文献[1, 4-5]给出了利用地固系卫星位置序列拟合 GPS 卫星 15 个轨道根数的公式和算法。

由于 GEO 轨道倾角小, 采用 GPS 广播星历参数形式拟合 GEO 卫星轨道可能因矩阵奇异而不收敛, 文献[1]提出坐标旋转的方法(下文称“严格法”)加以解决。具体做法可分为三个步骤:

- (1) 将地固系绕 Z 轴旋转 $t_{GAST} + \omega_b(t_k - t_{oe})$ 得到惯性系下的卫星位置(X 轴指向参考时刻春分点);
- (2) 绕 X 轴旋转 β 角, 得到新坐标系下的卫星位置;
- (3) 利用新坐标系下的卫星位置拟合 GEO 卫星广播星历。

以上坐标转换过程可以用式(1)来描述。

$$\mathbf{r}_{k, new} = \mathbf{R}_x(\beta) \mathbf{R}_z(t_{GAST} + \omega_b(t_k - t_{oe})) \mathbf{r}_k \quad (1)$$

式中, \mathbf{r}_k 表示 t_k 时刻 GEO 卫星在地固系中的位置向量; $\mathbf{r}_{k, new}$ 表示经过坐标转换后的卫星位置向量; ω_b 为地球自转速率; t_{oe} 表示星历拟合弧段的参考时刻; t_{GAST} 表示参考时刻的格林尼治恒星时。

按照上述方法拟合得到的广播星历参数要提供给用户使用, 除了要播发 15 个星历参数之外还要播发参考时刻格林尼治恒星时参数 t_{GAST} 。为此文献[2]提出简化的方法(下文称“简化法”), 即令 $t_{GAST} \equiv 0$ (相当于选择的惯性参考系 x 轴与 t_{oe} 时刻地固系 x 轴重合), 并试验验证了这样处理不会影响星历拟合的精度。关于 β 的取值, 文

献[1]和[2]对选择不同旋转角度(不超过 5°)进行了实验分析, 认为拟合精度对旋转角度的选择不敏感, 都推荐采用 5° 的旋转角(未说明原因)。

3 坐标旋转引起的卫星轨道根数变化分析

卫星在地球轨道的位置可用位置和速度表示, 也可采用 Kepler 轨道根数的形式表示。设在惯性坐标系 $OXYZ$ 中某一时刻卫星的 Kepler 轨道根数为: $a, e, i, \Omega, \omega, M$ 。图 1 是坐标旋转的示意图, X', Y', Z' 为旋转后的三个坐标轴, 卫星轨道交 XY 平面于 B , 交 $X'Y'$ 平面于 C , 设新坐标系 $OX'Y'Z'$ 中卫星轨道根数为: $a', e', i', \Omega', \omega', M'$ 。考虑球面三角形 BCD , 以 B, C, D 表示角及其值, b, c, d 表示边及其长, 依据球面三角形的基本公式^[6]有

$$\left. \begin{aligned} \cos C &= -\cos D \cos B + \sin D \sin B \sin c \\ \cos c \cos D &= \sin c \cot b - \sin D \cot B \\ \cos c \cos B &= \sin c \cot d - \sin B \cot D \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

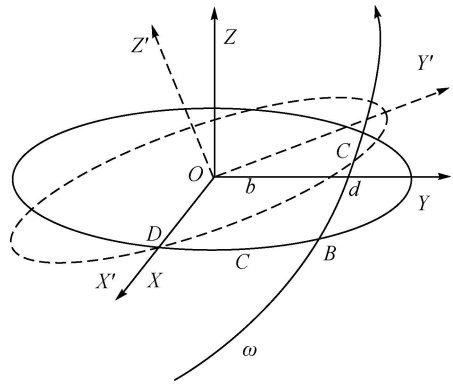


图 1 GEO 卫星轨道坐标旋转示意图

Fig. 1 Illustration for coordinate transformation

设坐标旋转角为 β (设 $\beta \geq 0$), 即 $D = \beta$ 。由轨道根数的定义知 $c = \Omega, b = \Omega', B = \pi - i, C = i'$, 由此可得到新旧坐标系下卫星瞬时轨道根数的关系式

$$\left. \begin{aligned} a' &= a \\ e' &= e \\ i' &= \arccos \left\{ \cos \beta \cos i + \sin \beta \sin i \cos \Omega \right\} \\ \Omega' &= \operatorname{arccot} \left\{ \frac{\cos \Omega \cos \beta - \sin \beta \cot i}{\sin \Omega} \right\} \\ \omega' &= \omega - d \\ M' &= M \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, $d = \operatorname{arccot} \left\{ \frac{-\cos \Omega \cos i + \sin i \cot \beta}{\sin \Omega} \right\}$

对于严格法, Ω 表示卫星轨道的升交点赤经, 对于某一卫星轨道, 如果忽略摄动引起的变化, Ω 的取值是一个常数, 式(3)中 Ω 不同的值就表示不同的卫星轨道。

对于简化法, Ω 表示卫星轨道的升交点经度, 即使认为卫星轨道的升交点赤经是常数(由于摄动原因会有随时间缓慢变化), 由于地球自转, 卫星轨道的升交点的经度是随时间快速变化的, 变化周期等于地球自转周期(约为 1 d)。这表示对于同一卫星轨道, 采用简化法, 选择不同参考时刻, 轨道升交点经度不同, 坐标旋转后的轨道倾角随升交点经度呈周期性变化。由式(3)知新坐标系下卫星轨道倾角 i' 并不恒等于 $|i - \beta|$ (根据定义, 轨道倾角为卫星通过参考面由南向北的方向与参考面的夹角, 因此恒为非负), 其取值随 Ω 变化, 变化周期为 1 d, 最大值为 $i + \beta$, 最小值为 $|i - \beta|$, 这意味着如果要保证在新坐标系下的轨道倾角大于某个设定的值如 5° , 选择的坐标旋转角必须大于 $i + 5^\circ$ 。如图 2 为 $i = 2^\circ$ ($\beta = 5^\circ, 10^\circ$) 时 i' 随 Ω 取值的变化。

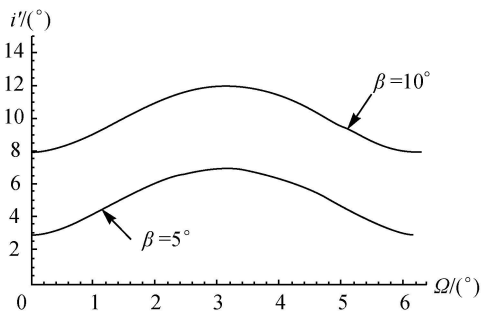


图 2 $i = 2^\circ$ ($\beta = 5^\circ, 10^\circ$) 时 i' 随 Ω 取值的变化
Fig. 2 i' as a function of Ω when $i = 2^\circ$

4 坐标旋转引起的卫星轨道根数摄动变化分析

设在坐标系 $OXYZ$ 和 $OX'Y'Z'$ 中, 卫星轨道根数的摄动分别为 $\Delta a, \Delta e, \Delta i, \Delta \Omega, \Delta M$ 和 $\Delta a', \Delta e', \Delta i', \Delta \Omega', \Delta M'$ 。对式(3)求导数可得到如下关系式

$$\left. \begin{aligned} \dot{a}' &= \dot{a} \\ \dot{e}' &= \dot{e} \\ \dot{i}' &= K_i \dot{\Omega} + K_{\Omega} \dot{\Omega} \\ \dot{\Omega}' &= J_i \dot{\Omega} + J_{\Omega} \dot{\Omega} \\ \dot{\omega}' &= \dot{\omega} + (L_i \dot{\Omega} + L_{\Omega} \dot{\Omega}) \\ \dot{M}' &= \dot{M} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} K_i &= \frac{(\cos \beta \sin i - \cos i \sin \beta \cos \Omega)}{\sqrt{1 - (\cos \beta \cos i + \sin \beta \sin i \cos \Omega)^2}} \\ K_{\Omega} &= \frac{\sin i \sin \beta \sin \Omega}{\sqrt{1 - (\cos \beta \cos i + \sin \beta \sin i \cos \Omega)^2}} \\ J_i &= \frac{-\csc^2 \Omega \csc \Omega \sin \beta}{1 + \csc^2 \Omega (\cos \beta \cos \Omega - \cot i \sin \beta)^2} \\ J_{\Omega} &= \frac{\cos \beta + \cot \Omega \csc \Omega (\cos \beta \cos \Omega - \cot i \sin \beta)}{1 + \csc^2 \Omega (\cos \beta \cos \Omega - \cot i \sin \beta)^2} \\ L_i &= \frac{-\csc \Omega (\cos i \cot \beta + \cos \Omega \sin i)}{1 + \csc^2 \Omega (-\cos i \cos \Omega + \cot \beta \sin i)^2} \\ L_{\Omega} &= \frac{(\cos i - \cot \Omega \csc \Omega (-\cos i \cos \Omega + \cot \beta \sin i))}{1 + \csc^2 \Omega (-\cos i \cos \Omega + \cot \beta \sin i)^2} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} L_i &= \frac{-\csc \Omega (\cos i \cot \beta + \cos \Omega \sin i)}{1 + \csc^2 \Omega (-\cos i \cos \Omega + \cot \beta \sin i)^2} \\ L_{\Omega} &= \frac{(\cos i - \cot \Omega \csc \Omega (-\cos i \cos \Omega + \cot \beta \sin i))}{1 + \csc^2 \Omega (-\cos i \cos \Omega + \cot \beta \sin i)^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

可以看出, 坐标系旋转以后, 新坐标系下的轨道根数摄动 i' 和 Ω' 受到 i 和 Ω 共同影响, i' 则在摄动量 Ω 的基础上吸收了 i 和 Ω 的影响。分析式(6)和式(7)可知, 当 $\Omega = \Omega \rightarrow i$ 时 $J_i \rightarrow -\infty, L_{\Omega} \rightarrow -\infty$; 当 $\beta = i, \Omega \rightarrow 0 \pm \pi$ 时 $J_i \rightarrow \pm \infty, L_i \rightarrow \pm \infty$ 。

图 3 和图 4 给出了 $i = 2^\circ$ ($\beta = 2^\circ, 2.1^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 30^\circ$) 时 K_i 和 K_{Ω} 随 Ω 的变化情况。可以看出 K_i 和 K_{Ω} 的变化周期为 $2\pi, K_i$ 的振幅为 1, K_{Ω} 的振幅为 $\sin i$ 。

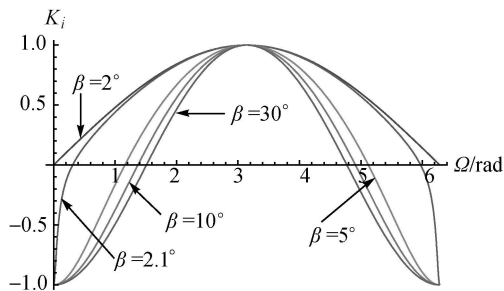


图 3 $i = 2^\circ$ (β 取不同值) K_i 随 Ω 的变化
Fig. 3 K_i as a function of Ω when $i = 2^\circ$

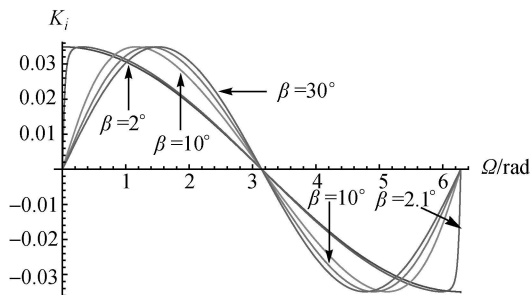


图 4 $i = 2^\circ$ (β 取不同值) K_{Ω} 随 Ω 的变化
Fig. 4 K_{Ω} as a function of Ω when $i = 2^\circ$

图 5 和图 6 给出了 $i = 2^\circ$ ($\beta = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 30^\circ$)

时 J_i 和 J_{Ω} 随 Ω 的变化情况。可以看出 J_i 和 J_{Ω} 随

Ω 变化而呈周期性变化,周期为 2π 。 J_i 的振幅因 β 的取值不同而不同, β 越接近于 i ,振幅越大, β 越大,振幅越小,逐渐逼近于接近 1 的小量;当 $\beta = 5^\circ$ 时 J_i 的振幅约为 15, $\beta = 30^\circ$ 时振幅约为 2。当 $\beta = 2^\circ$, $\Omega \rightarrow 0$ 时, $J_i \rightarrow -\infty$,这意味着轨道根数 Ω 和 i' 无法分离,是为奇点。当 β 固定时, J_Ω 的取值随 Ω 的变化,对于不同 β 值,振幅大小不一, ($\beta > i$) 越大,振幅越小,逐渐逼近 0。

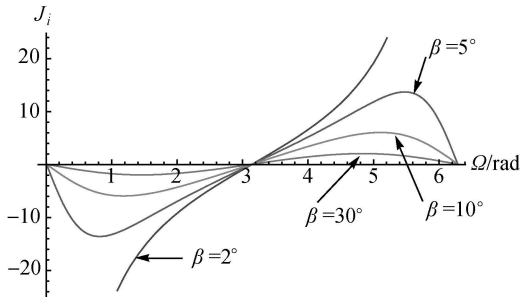


图 5 $i = 2^\circ$ (β 取不同值) J_i 随 Ω 的变化
Fig. 5 J_i as a function of Ω when $i = 2^\circ$

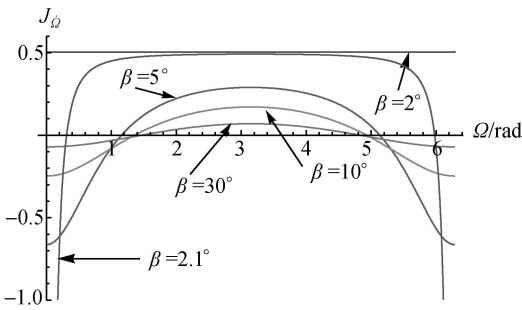


图 6 $i = 2^\circ$ (β 取不同值) J_Ω 随 Ω 的变化
Fig. 6 J_Ω as a function of Ω when $i = 2^\circ$

图 7 和图 8 给出了 $i = 2^\circ$ ($\beta = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 30^\circ$) 时 L_i 和 L_Ω 随 Ω 的变化情况。容易发现图 6、图 8 与图 5、图 6 非常相似,图 8 似乎只是图 6 的图形向下平移的结果,看起来确实是这样,主要是因为差别非常微小,从图形上无法区分。 L_i 的振幅随着 β 的增大,逐渐逼近 0。

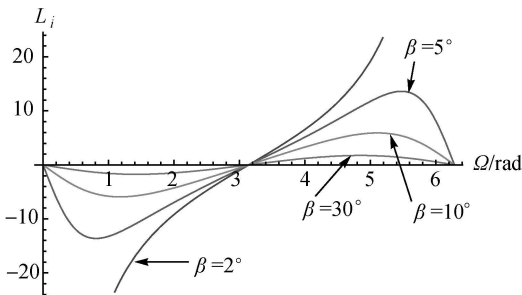


图 7 $i = 2^\circ$ (β 取不同值) L_i 随 Ω 的变化
Fig. 7 L_i as a function of Ω when $i = 2^\circ$

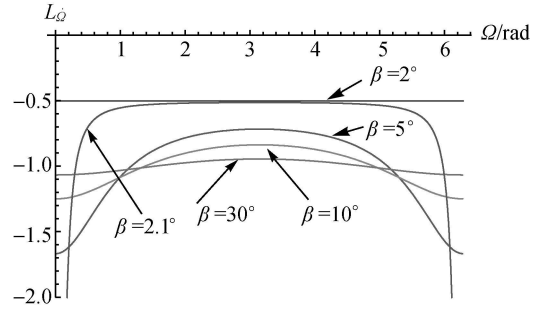


图 8 $i = 2^\circ$ (β 取不同值) L_Ω 随 Ω 的变化
Fig. 8 L_Ω as a function of Ω when $i = 2^\circ$

图 9 和图 10 给出了 $i = 2^\circ$ ($\Omega = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ$) 时 J_i 和 L_i 随 β 的变化,可以看出对于不同的 Ω 值,当 $\beta \rightarrow i$ 时, J_i 和 L_i 取得极值,当 $\beta > i$ 时 J_i 和 L_i 逐渐收敛到稳定的值。 $\beta > 0.3$ (rad) 时 J_i 和 L_i 的绝对值都小于 5。

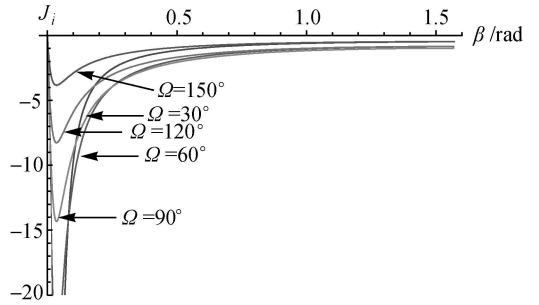


图 9 $i = 2^\circ$ (Ω 取不同值) J_i 随 β 的变化
Fig. 9 J_i as a function of β when $i = 2^\circ$

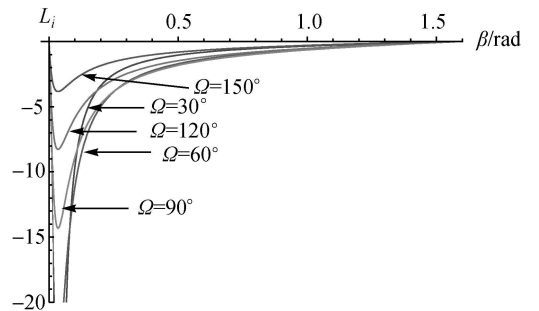


图 10 $i = 2^\circ$ (Ω 取不同值) L_i 随 β 的变化
Fig. 10 L_i as a function of β when $i = 2^\circ$

由以上分析可以看出,当 i 固定时, β 的值与 i 比较接近且选择某一惯性系 (Ω 接近 0) 时轨道倾角 i 的摄动 $i>$ 将被放大并叠加到的 Ω 和 Ω' 中 (放大系数为 J_i 和 L_i), 从而导致 Ω 和 Ω' 的取值范围变大。随着选择的旋转轴 (Ω) 不同,其放大倍数可能达到十几倍,甚至是成百上千倍。当 β 与 i 的值相差较大时,放大倍数明显减小,例如当 $i =$

$\mathcal{L}, \beta \geq 10^\circ$ 时, J_i 和 L_i 都小于 10。对于 GEO 卫星, 由于轨道摄动因素, 以及测控的策略不同, 其实际的轨道倾角并不是恒等于 0 的, 一般可以认为轨道倾角小于 $\pm 2^\circ$ 。因此为了避免坐标旋转后轨道根数出现奇点 ($\beta = i$), 同时尽可能地减小轨道倾角的摄动量被其他轨道根数摄动吸收, 建议实际应用时将坐标旋转角设为一个较大的值。

5 GEO 广播星历拟合实验与分析

为了分析选择不同惯性系参考系 (不同 X 轴指向或不同旋转角) 对 GEO 广播星历参数拟合的影响, 采用仿真的 GEO 轨道进行星历参数拟合实验。仿真轨道倾角初值取为 1.7° , 生成卫星轨道弧长为 12 d。考虑的力模型包括地球引力场球谐项 (15 阶), 第三体引力 (太阳、月球), 太阳辐射压、地球固体潮和海洋潮汐。取旋转角 β 等于 $3^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 55^\circ$ 和 80° , 分别采用简化法 (即

选择的惯性系 X 轴与为 TEO 时刻地固系 X 轴重合) 进行星历参数拟合实验, 拟合弧段为 4 h, 共得到 286 组广播星历参数。

图 11 给出了 β 取不同值时, 广播星历参数 $\Delta n(\text{dn})$ 、 \mathcal{Q}_e 、 i_e 拟合结果序列, 单位为 $\pi \times 10^{-10}$ 。可以看出随着 β 的增大, Δn 和 \mathcal{Q}_e 的振幅逐渐减小, 而 i_e 的振幅几乎没有变化。当 β 为 55° 和 80° 时, \mathcal{Q}_e 和 i_e 的振幅趋于一致, 而且似乎存在“共振”现象。当 β 大于 30° 时, Δn 振幅小于 10。

表 1 统计了取不同旋转角时 Δn 、 \mathcal{Q}_e 、 i_e 的取值范围 (最大值和最小值)。很明显随着 β 增大, Δn 和 \mathcal{Q}_e 的取值范围逐渐减小, 而 IDOT 几乎没有变化。另外应该注意到式 (4) 中, J_i 和 L_i 前边的符号相反, 所以表中 Δn 的 max 和 \mathcal{Q}_e 的 min 的绝对值非常接近 (β 较小的时候), 这说明此时 Δn 和 \mathcal{Q}_e 的拟合结果主要来自倾角摄动的贡献, 这一现象与 4 节中分析结果是一致的。

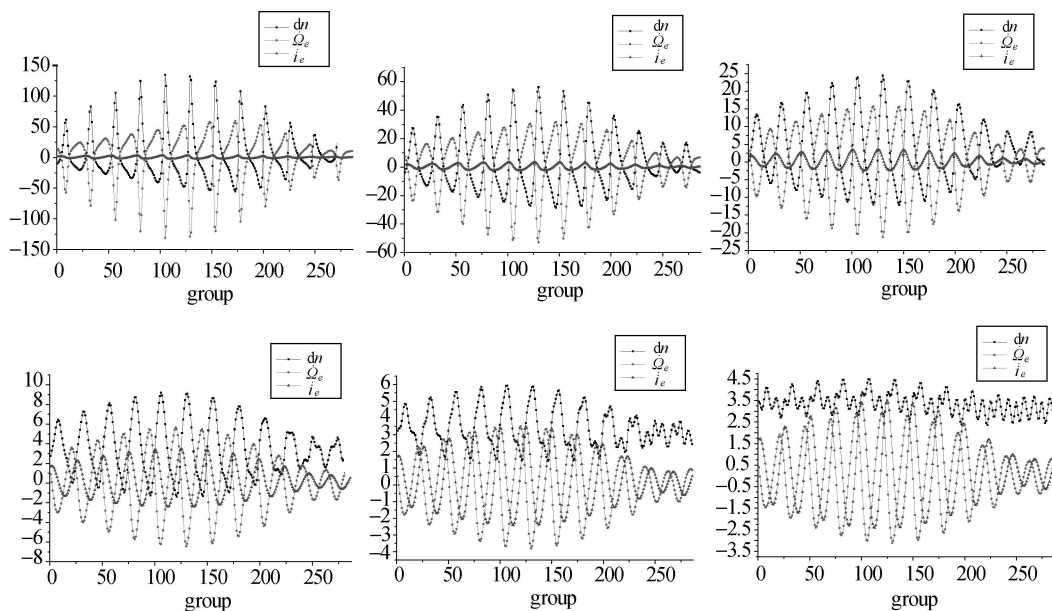


图 11 采用不同坐标旋转角 Δn 、 \mathcal{Q}_e 、 i_e 拟合结果序列 (单位: $\pi \times 10^{-10}$)

Fig. 11 fitted series of Δn 、 \mathcal{Q}_e 、 i_e with respect to different rotation angular

表 1 采用不同旋转角时 Δn 、 \mathcal{Q}_e 、 i_e 的最大值和最小值

Tab. 1 max and min value of Δn 、 \mathcal{Q}_e 、 i_e with respect to different rotation angular

$/\pi \times 10^{-10}$

β	Δn		\mathcal{Q}_e		i_e	
	min	max	min	max	min	max
3°	- 55.316 7	134.535	- 131.149	58.326 3	- 2.386 60	3.375 44
5°	- 28.502 9	56.152 3	- 52.877 6	31.657 2	- 2.400 67	3.378 56
10°	- 12.139 5	24.381 2	- 21.241 9	15.660 8	- 2.421 55	3.404 96
30°	- 1.385 5	9.179 6	- 6.444 2	5.643 94	- 2.411 45	3.487 99
55°	1.404 0	5.934 2	- 3.804 8	3.489 4	- 2.418 17	3.491 43
80°	2.358 3	4.484 5	- 3.112 8	2.920 3	- 2.411 00	3.392 26

式(3)表明,坐标旋转不会对轨道长半轴和偏心率产生影响,故选择不同的旋转角不会使 \sqrt{A} 和 e 拟合结果发生变化(忽略拟合误差),拟合试验也验证的这一点。试验还发现选择不同的旋转角广播星历中其他参数拟合结果取值范围的变化很小。

6 结论与建议

本文介绍了基于坐标变换的GEO卫星广播星历拟合方法,推导了坐标变换前后卫星瞬时轨道根数及其摄动量的解析关系式并从理论和实验两个方面进行分析。分析结果表明:

(1) 采用简化法,经坐标变换后得到的轨道倾角不为常数,而是随着选择的参考历元不同呈周期性变化。

(2) 选择不同的惯性参考系(不同旋转角或不同的 X 轴指向)会导致轨道倾角摄动以不同的放大倍数放大后被新坐标系的轨道升交点赤经摄动和近地点幅角摄动吸收,这一放大倍数可能达到几十倍、上百倍甚至出现奇点。这说明以Kepler根数形式表示的轨道摄动不完全是动力学因素引起的物理摄动,还反映了根数之间非正交性产生的“数学”摄动。

(3) 仿真GEO轨道的星历拟合试验也表明:拟合得到的GEO卫星星历参数 Δn 和 \mathcal{Q}_e 的取值范围随坐标旋转角的增大而减小,当旋转角大于 55° 时, Δn 和 \mathcal{Q}_e 的取值都远小于 $10^{-10}\pi$ 。

鉴于GEO卫星轨道的实际轨道倾角一般在 $\pm 2^\circ$,为了避免坐标旋转后轨道根数出现奇点,同时尽可能地减小轨道倾角摄动被其他轨道根数摄动吸收,建议实际应用中坐标旋转的将旋转角设在一个较大的值。

参考文献:

[1] HUANG Yong, HU Xiaogong, WANG Xiaoya, et al.

Precision Analysis of Broadcast Ephemeris for Medium and High Orbit Satellites [J]. Progress in Astronomy, 2006, 24(1): 81-88. (黄勇, 胡小工, 王小亚, 等. 中高轨卫星广播星历精度分析 [J]. 天文学进展, 2006, 24(1): 81-88.)

[2] CHEN Liucheng, TANG Bo. Impact of Coordinate Transformation on Fitting Accuracy of Kepler Broadcast Ephemeris [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2006, 25(4): 19-25. (陈刘成, 唐波. 参考系选择对 Kepler 广播星历参数拟合精度的影响 [J]. 飞行器测控学报, 2006, 25(4): 19-25.)

[3] PARKINSON B W. The NAVSTAR/Global Positioning System [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1983. (帕金森 B W. 导航星全球定位系统 [M]. 北京: 测绘出版社, 1983.)

[4] HAO Jinming. GPS Broadcast Ephemeris Fitting Using Station Observations [D]. Zhengzhou: Institute of Surveying and Mapping, 1989. (郝金明. 利用地面测轨资料拟合 GPS 广播星历 [D]. 郑州: 郑州测绘学院, 1989.)

[5] CUI Xianqiang, JIAO Wenhui, JIA Xiaolin, et al. Comparisons of Two Kinds of GPS Broadcast Ephemeris Parameter Algorithms [J]. Chinese Journal of Space Science, 2006, 26(5): 382-387. (崔先强, 焦文海, 贾小林, 等. 两种 GPS 广播星历参数算法的比较 [J]. 空间科学学报, 2006, 26(5): 382-387.)

[6] XIA Yifei, HUANG Tianyi. Spherical Astronomy [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1995. (夏一飞, 黄天衣. 球面天文学 [M]. 南京: 南京大学出版社, 1995.)

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2011-01-30

修回日期: 2011-03-23

第一作者简介: 阮仁桂(1983—),男,硕士,助理工程师,现从事GNSS数据处理研究。

First author: RUAN Rengui (1983—), male, master, assistant engineer, majors in GNSS data positioning.

E-mail: rrg2002me@163.com